



微生物を模擬したマイクロマシンの最適べん毛形状

著者	藤田 達也, 河合 達雄, 尾鍋 悠太郎
journal or publication title	日本機械学会論文集. B編
volume	68
number	670
page range	1745-1751
year	2002-06
権利	日本機械学会 本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
その他のタイトル	Optimum Flagellum Shape of a Micromachine Imitating a Microorganism
URL	http://hdl.handle.net/2241/100753

微生物を模擬したマイクロマシンの最適べん毛形状*

藤田 達也^{*1}, 河合 達雄^{*2}, 尾鍋 悠太郎^{*3}

Optimum Flagellum Shape of a Micromachine Imitating a Microorganism

Tatsuya FUJITA, Tatsuo KAWAI^{**} and Yutarou ONABE^{**} Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

The purpose of the present study is to develop micromachines imitating flagellated microorganisms. The speed of advance, the radius of trajectory and the power consumption of a micromachine are computed by using the boundary element method to optimize seven parameters that express the shape of an actual microorganism and six parameters that stand for the flagellum shape of a micromachine. The optimum cross-sectional shape of the flagellum is an ellipse which is somewhat inclined with respect to the principal normal line of the flagellum spiral. The optimum thickness distribution of the flagellum is such that the position of maximum thickness is very close to the head of the machine. The optimization leads to the reduction of power consumption by 22 percent compared with the power consumed by the actual microorganism.

Key Words: Bio-fluid Mechanics, Viscous Flow, Numerical Analysis, Micromachine, Boundary Element Method, Flagella, Microorganism

1. 緒 言

微生物の中には、らせん状のべん毛をべん毛モータで回転させることによって運動しているものが存在する。工学的には、将来、この運動や機構を模したマイクロマシンを製作することが期待される。

べん毛を有する微生物の流体力学的側面からの運動解析は、抵抗力理論や細長物体理論を用いて行われてきたが、微生物の形状に制限を要する等の欠点があった。Phan-Thien ら⁽¹⁾は、境界要素法を利用することにより、微生物の形状に制限を設けない解法を提案した。また、後藤ら⁽²⁾は境界要素法による結果と比較することで、抵抗力理論における抵抗係数の評価を行い、高精度の抵抗係数を得た。また、計算機上での計算にとどまらず、実際に微生物の運動を観察し、境界要素法と比較を行った研究もなされ、観察と計算結果の一致が確認された⁽³⁾。著者ら⁽⁴⁾は Phan-Thien の計算では用いられなかったパラメータを加えた計算を行い、

べん毛断面の偏平率変化による運動効率の上昇を得た。自然界の微生物のべん毛は、一定太さで円形断面のものしかないが、マイクロマシンへの応用を考えるときはこの限りではない。本研究では、さらなる運動効率の上昇を目的に、より詳細なべん毛形状の変化に対する、速度、消費パワー、らせん状軌跡の半径の変化を求め、推進に適した形状を求めた。

記 号

a, A, B, B' : 頭部の寸法
 b, b_1, b_2, b_s : べん毛の太さ
 c, c_1, c_2 : べん毛断面の x' 軸方向寸法
 d, d_1, d_2 : べん毛断面の y' 軸方向寸法
 F : 無次元パワー
 G_{ij}, H_{ij} : 基本解
 h : べん毛らせん半径
 k : べん毛らせんの波数
 k_E : 拡大係数
 L : べん毛長さ
 L_{\max} : 太さ最大点までのべん毛長さ
 N_λ : べん毛巻き数
 p : 圧力
 P : マイクロマシンの消費パワー

* 原稿受付 2001 年 10 月 9 日。

^{*1} 正員, 陸上自衛隊(☎ 410-1432 静岡県駿東郡小山町須走 27-2)。^{*2} 正員, 筑波大学機能工学系(☎ 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。^{*3} 筑波大学大学院。

E-mail: kawai@kz.tsukuba.ac.jp

r_n, r_b : べん毛中心線の主, 従法線ベクトル

R : 無次元らせん状軌跡半径

R_h : らせん状軌跡半径

s : べん毛中心線に沿った座標

t : 表面力

u : 速度

U : マイクロマシンの推進速度

\bar{U} : 軸方向速度

W : 無次元軸方向速度

X, x : 位置ベクトル(大文字はソース点)

μ : 粘性係数

θ : べん毛断面の回転角度

ω : べん毛モータの角速度

Ω : カウンタローテーションによる角速度

2. モデル

図1に示すように, 頭部と1本のらせん状のべん毛を有するマイクロマシンのモデルを考える。以前の研究⁽⁴⁾と同じく, x 軸について軸対称な頭部の形状を A, B, B' で表し, 頭部と同じ体積をもつ球の半径 a を頭部の大きさを表すパラメータとする。べん毛の中心線の方程式を以下に示すようなものとする。

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= \{x, hE(x) \cos kx, hE(x) \sin kx\} \\ E(x) &= 1 - \exp\{-(k_E x)^2\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

また, べん毛の巻き数を N_h , べん毛長さを L とする。

図2にべん毛を直線状に伸ばした模式図を示す。べん毛の中心線に沿った座標を s とし, 先端部と後端部のべん毛太さを $b_2, s=L_{\max}$ で最大太さ b_1 をとるとすると, s でのべん毛太さ b_s は,

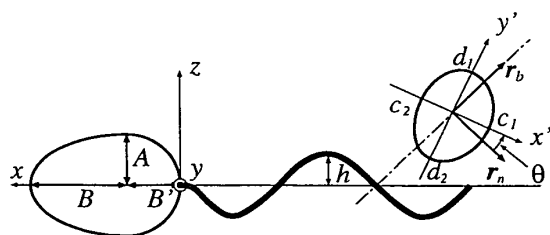


Fig. 1 Model of micromachine

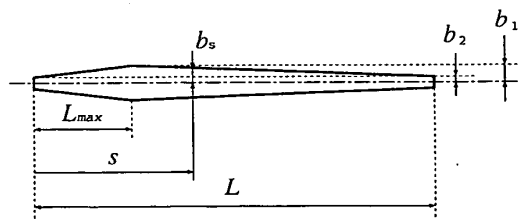


Fig. 2 Thickness distribution of flagellum

$$\begin{aligned} s < L_{\max} \quad b_s &= b_2 + \frac{b_1 - b_2}{L_{\max}} s \\ s \geq L_{\max} \quad b_s &= b_1 - \frac{b_1 - b_2}{L - L_{\max}} (s - L_{\max}) \end{aligned}$$

$\dots\dots\dots (2)$

で表される。 b_1/b_2 をべん毛太さ比, L_{\max}/L をべん毛太さ最大位置を示すパラメータとする。 b_1/b_2 を変化させる際には, 一定の半径 b の円形断面をもつべん毛と同体積を保つようにし, この b をべん毛太さを表すパラメータとした。

式(1)の中心線に関する内向き主法線ベクトルを r_n , 従法線ベクトルを r_b とする。この二つのベクトルを含む平面上に, 図1に示すように, θ だけ回転させた局所座標系 $x'y'$ 系を考える。このとき,

$$\begin{aligned} x' \geq 0, \quad y' \geq 0 \quad & \frac{x'^2}{c_1^2} + \frac{y'^2}{d_1^2} = 1 \\ x' \geq 0, \quad y' < 0 \quad & \frac{x'^2}{c_1^2} + \frac{y'^2}{d_2^2} = 1 \\ x' < 0, \quad y' \geq 0 \quad & \frac{x'^2}{c_2^2} + \frac{y'^2}{d_1^2} = 1 \\ x' < 0, \quad y' < 0 \quad & \frac{x'^2}{c_2^2} + \frac{y'^2}{d_2^2} = 1 \end{aligned}$$

$\dots\dots\dots (3)$

の方程式で表される厚みをつけたものをべん毛断面のモデルとした。 $c = (c_1 + c_2)/2$, $d = (d_1 + d_2)/2$ として, d/c をべん毛の偏平率を表すパラメータ, $c_1/c_2, d_1/d_2$ を, それぞれ x', y' 軸に対する偏平率を表すパラメータと定義する。これらのパラメータを変化させる際には, その位置でのべん毛太さ b_s を半径とする円と同一の断面積となるように補正を行った。

これらの形状を表すパラメータを整理することにより, 以下の13の無次元パラメータを得ることができる。すなわち, べん毛巻き数 N_h , らせん半径 hk , 拡大部長さ k/k_E , べん毛半径 b/a , べん毛長さ L/a , 頭部細長比 B/A , 頭部前後長さ比 B/B' , べん毛偏平率 d/c , 断面回転角 θ , x' 軸偏平率 c_1/c_2 , y' 軸偏平率 d_1/d_2 , べん毛太さ最大位置 L_{\max}/L , べん毛太さ比 b_1/b_2 である。このうち, 前の七つが実際の微生物の形状を表すパラメータで, 後ろの六つがべん毛断面形状を表すパラメータである。

3. 計算方法

マイクロマシンは無限に広い静止流体中を, 一定の角速度で回転するべん毛モータの作り出す推進力のみで運動しているものとする。マイクロマシンのもととなる微生物のレイノルズ数は 10^{-5} のオーダーで, マイクロマシンが一定の力を受けて定常状態に達する時間

と、べん毛モータの回転周期の比は 10^{-4} のオーダーであるので、モデル周りの流れは各瞬間において、定常ストークス流れとみなすことができる⁽²⁾。境界条件としては、マイクロマシン表面での粘着条件と、マイクロマシンから無限に離れた点での静止条件があげられる。これらの条件を式で表すと次のようになる。

$$\text{流体内部 } u_{i,i}=0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{流体内部 } p_{,i}=\mu u_{i,ii} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{マイクロマシン表面 } u_i=\bar{u}_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{無限遠の点 } u_i=0, p=0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

添字は方向を示し、カンマの後はその方向での微分を表す。 u_i は速度ベクトルを、 p は圧力を、 μ は粘性係数を示す。また \bar{u}_i はマイクロマシン表面の速度ベクトルである。

式(5)に発散定理を用いて境界積分方程式を求め、これを N 個の一定要素で離散化することで以下に示す、離散化境界積分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \delta_{ij} u_i^{(k)} + \sum_{n=1}^N u_i^{(n)} \int_{S_n} H_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{X}) dS(\mathbf{x}) \\ = \sum_{n=1}^N t_i^{(n)} \int_{S_n} G_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{X}) dS(\mathbf{x}) . \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。 \mathbf{X}, \mathbf{x} はそれぞれソース点、観測点を表すベクトルである。括弧付の指標は要素番号を表し、 (k) はソース点要素を、 (n) は観測点要素を表す。積分は n 要素上の面積分を表し、 $t^{(n)}$ は n 要素上での一定の表面力を表す。 G_{ij}, H_{ij} は基本解と呼ばれ、その形は以下のように表される。

$$\begin{aligned} G_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{X}) &= \frac{1}{8\pi\mu r} \left(\delta_{ij} + \frac{r_i r_j}{r^2} \right) \\ H_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{X}) &= -\frac{3}{4\pi r^5} r_i r_j \mathbf{r} \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $\mathbf{r}=\mathbf{x}-\mathbf{X}$ であり、 $r=|\mathbf{r}|$ である。 \mathbf{n} は境界要素の流体からの外向き単位法線ベクトルである。要素(1)～(N) までについて式(8)と同様の式を導き、これをまとめてマトリックス表示することにより、速度ベクトルと表面力ベクトルの関係、

$$[H][u]=[G][t] \quad \dots\dots\dots (10)$$

を得ることができる。

べん毛モータが角速度 ω で回転することによって、マイクロマシンが速度 \mathbf{U} で推進し、頭部に角速度 Ω のカウンターテーションが生ずるとすると、マイクロマシン表面の速度は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{u}} &= \mathbf{U} + \Omega \times \mathbf{x} && \text{頭部要素上} \\ \bar{\mathbf{u}} &= \mathbf{U} + (\Omega + \omega) \times \mathbf{x} && \text{べん毛要素上} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(11)を式(10)の $[u]$ に代入することで、各要素上の表面力ベクトル $t^{(n)}$ を $\mathbf{U}, \Omega, \omega$ の関数で表すことができる。

慣性力が無視できるので、各瞬間において外部からマイクロマシンに加えられる力とモーメントの和は零である⁽²⁾。

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N S_n t^{(n)} &= 0 \\ \sum_{n=1}^N S_n \mathbf{x}^{(n)} \times t^{(n)} &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12)$$

この式に $t^{(n)}$ を代入することによって、 ω をパラメータとして六つの未知数 \mathbf{U}, Ω が求まる。

らせん状のべん毛を回転させることによって推進するマイクロマシンの軌跡は、それ自身も小さなせんを描くことが知られており、このうち、実質的な推進速度となる x 軸方向推進速度 \bar{U} と、頭部とべん毛部の接合点が描くらせん状軌跡の半径 R_h は、以下のようになる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

$$\begin{aligned} \bar{U} &= U \cdot \frac{\Omega + \omega}{|\Omega + \omega|} \\ R_h &= \frac{|(\Omega + \omega) \times U|}{|\Omega + \omega|^2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (13)$$

これらをそれぞれ、らせん波が後方に伝わっていく見掛けの速度 ω_1/k と、頭部半径 a で無次元化したものを、無次元軸方向速度 $W=\bar{U} \cdot (k/\omega_1)$ 、無次元らせん状軌跡半径 $R=R_h/a$ とする。また、マイクロマシンの消費パワー P を、マイクロマシンの全表面において、速度とマイクロマシンが流体から受ける表面力との内積を積分したものとする。これを、頭部と同体積の球を一方向に速さ \bar{U} で運動させるのに必要なパワーで無次元化したものを無次元パワー $F=P/(6\pi\mu a \bar{U}^2)$ と定義する。マイクロマシンの形状パラメータをさまざまに変化させた場合における無次元軸方向速度 W 、無次元らせん状軌跡半径 R 、無次元パワー F の値から、マイクロマシンの形状が運動に及ぼす影響について調べた。また、各種パラメータの最適条件については、無次元パワーの小さなものが最適であるとした。

モデルの頭部の離散化には天頂角と方位角をもとにした百二十面体を用いた。べん毛の離散化にあたっては、Phan-Thien ら⁽¹⁾ の用いた五角柱あるいは六角柱近似や、著者らが以前の研究⁽⁴⁾ で用いた六角柱近似よりも高精度の八角柱近似を用いた。これは本研究の興味の対象が断面形状の違いが運動に及ぼす影響にあり、八角柱近似が五角柱および六角柱近似よりも適切にこの違いを近似できるからである。また計算におけ

る要素分割数は、マイクロマシンの形状により異なるが、標準で1500要素程度である。

4. 結果と検討

マイクロマシンの最適形状を求めるためには、パラメータのすべての組合せについて計算するべきであるが、これは時間がかかりすぎるので現実的ではない。そこで、他のパラメータの値を固定した状態で一つのパラメータによる影響を調べる。この際、そのパラメータについても離散的な点でしか計算をしていないので、厳密には最適値とはいえない。しかし、最適点の付近では細かく計算を行うようにすることで、最適値に近い値を求める。このような計算を順に行うことによって最適値に近いパラメータの組合せを探すこととする。

べん毛の要素分割方法の変更に伴い、べん毛断面形状以外のパラメータの最適値が前報⁽⁴⁾のものと違うか否かについて、再計算を行った。その結果、べん毛形状以外のパラメータの最適値は、すべてが前報と同じ値となった。このことは、境界要素法による解析がある程度の分割方法の違いを吸収できることを示している。この最適なパラメータの組合せは、 $N_A=2.0$, $hk=1.0$, $k/k_E=2.0$, $b/a=0.02$, $L/a=12.0$, $B/A=$

1.4, $B/B'=1.0$ である。

4.1 べん毛偏平率 べん毛偏平率 d/c による無次元軸方向速度と無次元パワーの変化を図3(a)に示し、軌跡の半径を図3(b)に示す。無次元軸方向速度は単調減少、無次元パワーは単調増加している。また、軌跡半径は、減少した後ゆるやかに増加している。このパラメータには最適値は存在せず、小さければ小さいほうがよいといえる。

4.2 断面回転角度 べん毛偏平率0.2, 0.6, 1.0の場合における、断面の回転角度 θ による変化を図4に示す。べん毛偏平率が1.0の場合については、回転によって形状が変化しないので、一点のみプロットし、直線で値を表してある。なお、角度 $\theta=90^\circ$ と $\theta=-90^\circ$ は $c_1/c_2=d_1/d_2=1$ のとき同じ形状である。無次元軸方向速度は偏平率0.6の場合は 90° で最小、 0° で最大値をとっており、偏平率0.2の場合は 90° で最小、 -5° で最大値をとっている。無次元パワーは偏平率0.6の場合は、 90° で最大、 0° で最小値をとり、偏平率0.2の場合は 90° で最大、 -5° で最小値をとる。軌跡半径は偏平率0.6では、 90° で最大、 -5° で最小値をとり、偏平率0.2では 60° で最大、 -10° で最小値をとっている。

速度、パワー、軌跡半径のすべてについて、偏平率

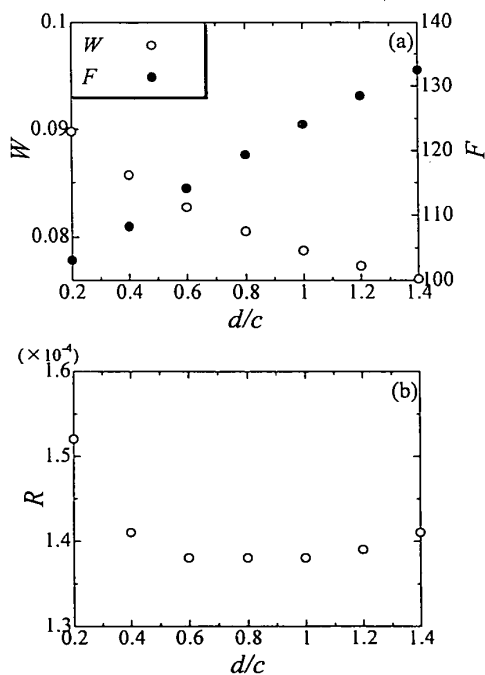


Fig. 3 (a) Changes in W and F with d/c ,
(b) Change in R with d/c
($N_A=2$, $hk=1$, $k/k_E=2$, $b/a=0.02$,
($L/a=12$, $B/A=1.4$, $B/B'=1$,
($c_1/c_2=1$, $d_1/d_2=1$, $b_1/b_2=1$)

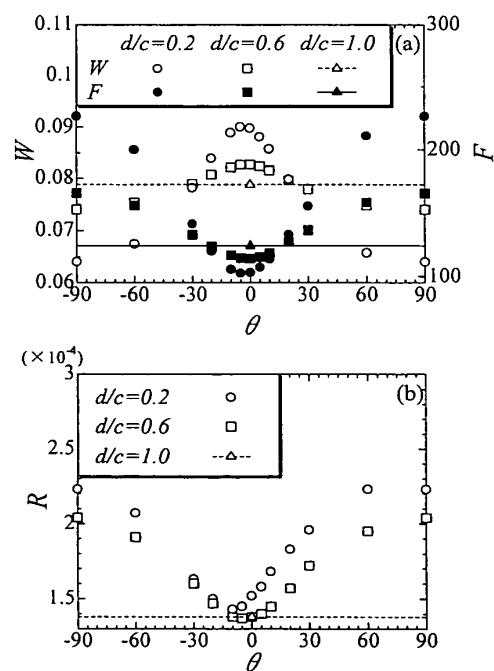


Fig. 4 (a) Changes in W and F with θ ,
(b) Change in R with θ
($N_A=2$, $hk=1$, $k/k_E=2$, $b/a=0.02$,
($L/a=12$, $B/A=1.4$, $B/B'=1$,
($c_1/c_2=1$, $d_1/d_2=1$, $b_1/b_2=1$)

が小さいほうが回転角度に敏感である。その場合、これら性能が向上する角度範囲は、性能低下の角度範囲に比べて狭いことがわかる。すなわち、偏平率が1.0の場合に比べて、速度の向上範囲は $\pm 30^\circ$ 、パワーの向上範囲は $\pm 20^\circ$ に狭まっており、軌跡半径については、 -10° から 0° とさらに狭くなっている。さらに、性能向上の程度については、速度およびパワーについては顕著であるが、軌跡半径については、ほとんど改善されていない。また、図4(a)において $\theta=0^\circ$ に関して左右対称の点を比べると、 $\theta<0^\circ$ のほうが速度が速く、パワーが小さい。また、その差は偏平率が小さいほど大きい。軌跡半径については、パワーにおけるものより小さな角度で極小値をとっている。傾きが 0° 付近がすべての面で優れているが、偏平率が小さくなるにつれて最適な回転角度の値は小さくなる。また、その傾向は、速度、パワーよりも軌跡半径により顕著に現れる。べん毛断面回転角の最適値は $d/c=0.2, 0.6$ について、それぞれ $-5^\circ, 0^\circ$ である。

4.3 x' 軸方向偏心率 x' 軸方向偏心率 c_1/c_2 による変化について図5に示す。傾き $\theta=-5^\circ, 0^\circ$ のいずれの場合にも無次元軸方向速度は単調減少となっているが、その変化率は小さい。無次元パワーについては変化がほとんど見られない。軌跡半径は増加傾向で

あるが、その変化はかなり小さい。

x' 軸方向偏心率が小さいとき、つまり、べん毛の主法線正方向への厚みが負方向への厚みに対して小さいときに、速度が速く、軌跡半径が小さくなる。しかし、この変化はべん毛断面形状の変化だけによるものでなく、このパラメータの変化が実質的には、べん毛のらせん半径のわずかな増減を引き起こすことによる可能性もある。しかし、その変化率は小さく、またパワーについては値の変化がほとんど見られないので、このパラメータが運動に及ぼす影響は小さいといえる。また、 $\theta=-5^\circ$ のほうがすべての点で優れていることがわかる。パワーについては有意な変化が見られないので、 c_1/c_2 の最適値を最も標準的な1とする。

4.4 y' 軸方向偏心率 y' 軸方向偏心率 d_1/d_2 による変化を図6に示す。この偏心率が変わっても、無次元軸方向速度、無次元パワー、軌跡半径のいずれもほとんど変化しない。このことから、 y' 軸方向偏心率が運動に及ぼす影響はほとんどないといえる。また、 $\theta=-5^\circ$ のほうが 0° よりもすべての点で優れていることがわかる。このパラメータの最適値を最も標準的な1とする。

4.5 べん毛太さ最大位置 いくつかのべん毛太さ比 b_1/b_2 における、太さ最大位置 L_{\max}/L による変

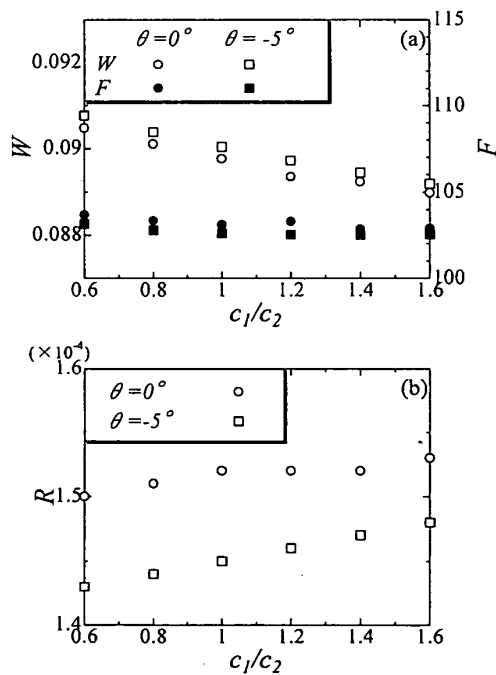


Fig. 5 (a) Changes in W and F with c_1/c_2 ,
(b) Change in R with c_1/c_2
($N_A=2, h k=1, k/k_E=2, b/a=0.02,$
($L/a=12, B/A=1.4, B/B'=1,$
($d/c=0.2, d_1/d_2=1, b_1/b_2=1$)

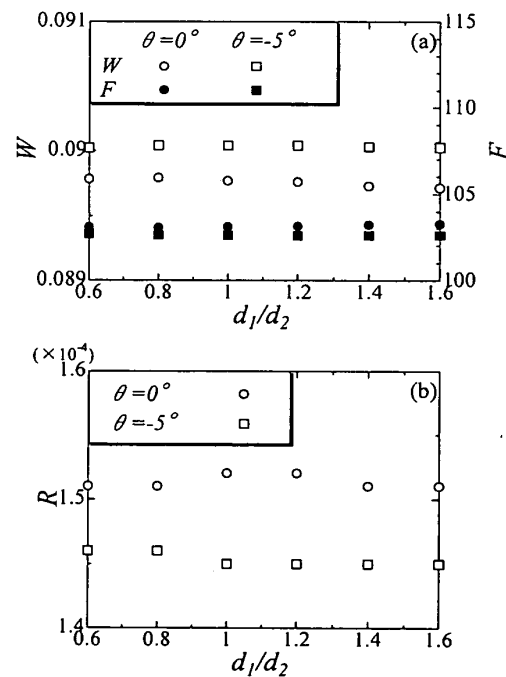


Fig. 6 (a) Changes in W and F with d_1/d_2 ,
(b) Change in R with d_1/d_2
($N_A=2, h k=1, k/k_E=2, b/a=0.02,$
($L/a=12, B/A=1.4, B/B'=1,$
($d/c=0.2, c_1/c_2=1, b_1/b_2=1$)

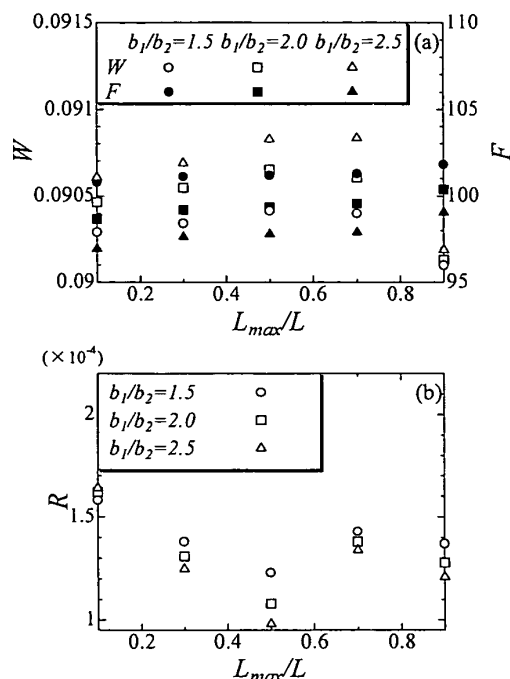


Fig. 7 (a) Changes in W and F with L_{\max}/L ,
(b) Change in R with L_{\max}/L

$$\left(\begin{array}{l} N_A=2, hk=1, k/k_E=2, b/a=0.02, \\ L/a=12, B/A=1.4, B/B'=1, \\ d/c=0.2, \theta=-5^\circ, c_1/c_2=1, d_1/d_2=1 \end{array} \right)$$

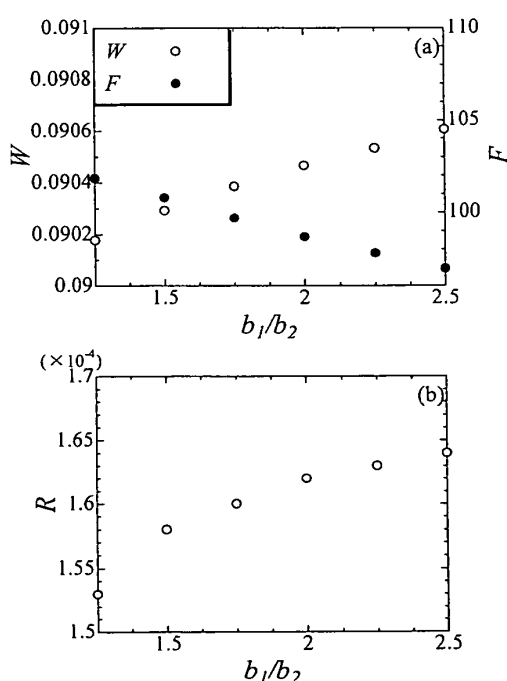


Fig. 8 (a) Changes in W and F with b_1/b_2 ,
(b) Change in R with b_1/b_2

$$\left(\begin{array}{l} N_A=2, hk=1, k/k_E=2, b/a=0.02, \\ L/a=12, B/A=1.4, B/B'=1, \\ d/c=0.2, \theta=-5^\circ, c_1/c_2=1, d_1/d_2=1, \\ L_{\max}/L=0.1 \end{array} \right)$$



Fig. 9 Optimum shape of micromachine

$$\left(\begin{array}{l} N_A=2, hk=1, k/k_E=2, b/a=0.02, \\ L/a=12, B/A=1.4, B/B'=1, \\ d/c=0.2, \theta=-5^\circ, c_1/c_2=1, d_1/d_2=1, \\ L_{\max}/L=0.1, b_1/b_2=2.5 \end{array} \right)$$

化を図7に示す。無次元軸方向速度は、べん毛太さ比1.5と2.0では $L_{\max}/L=0.5$ で最大値をとり、太さ比2.5では $L_{\max}/L=0.7$ で最大値をとっている。無次元パワーはべん毛太さ比によらず、 $L_{\max}/L=0.1$ で最小値をとり、軌跡半径は $L_{\max}/L=0.5$ のとき最小値をとっている。

べん毛太さ最大位置が後方になるにつれて速度はゆっくりと増加するが、ある位置を境に急激に減少する。この速度極大位置は、べん毛太さ比が大きいほど後ろにずれる。軌跡半径は、すべてのべん毛太さ比について、べん毛太さ最大位置0.7でやや大きくなっている。この場合、べん毛の巻き数が2なので、頭部との接合部から1.4波長の位置でべん毛太さは最大である。このように、べん毛太さ最大位置が頭部から離れてトルクの影響の出やすい位置にあり、かつ、2波長めの中付近という軸対称性が顕著にくずれる位置にあることが、軌跡半径の増大を招いていると思われる。しかし、この影響は小さく、パワーにはほとんど反映されていない。パワーは、べん毛太さ比によらず、べん毛太さ最大位置が前にあるほど小さい。べん毛太さ最大位置に最適値は存在せず、前方にあるものほどよいといえる。

4.6 べん毛太さ比 べん毛太さ比 b_1/b_2 による変化について図8に示す。無次元軸方向速度は単調増加、無次元パワーは単調減少している。軌跡半径も単調に増加しているが、増加率は減少している。図8より、べん毛太さ比が大きいほうが速度とパワーの面で優れていることがわかる。このパラメータの最適値は存在せず、大きければ大きいほどよいといえる。

5. 結 論

らせん状べん毛を有する微生物を模擬したマイクロマシンの運動を、特にべん毛形状の変化に注目し、境界要素法を用いて解析した。運動を無次元軸方向速度、無次元パワー、無次元らせん状軌跡半径によって評価し、無次元パワーが最小な最適な形状を求めた。今回導入した新しいパラメータ以外の最適値は、境界

要素の分割方法が違ってもかかわらず、以前⁽⁴⁾と同じ値となった。べん毛形状に関するパラメータの最適値は、べん毛偏平率はできるだけ小さく、断面回転角度はべん毛偏平率が0.2, 0.6のときそれぞれ $-5, 0^\circ$ 、 x' 軸偏心率と y' 軸偏心率には明確な最適値がなく、べん毛太さ最大位置はできるだけ前方に、べん毛太さ比はできるだけ大きくという結果となった。ただし、この最適なべん毛形状は、べん毛形状の変化を考慮しない微生物の最適形状に対するものである。したがって、本体とべん毛形状を含めた最適形状はほかに存在する可能性がある。

図9に、今回の計算におけるマイクロマシンの最適形状を示す。この際、 d/c , L_{\max}/L , b_1/b_2 には今回の計算範囲での最適値を用いた。図9よりべん毛がらせん軸に対して鋭く立っているようすと、べん毛が頭部から離れるにつれて細くなるようすがわかる。べん毛断面形状が円形の場合の無次元パワーは124.08で、図9に示す形状の場合は96.94である。べん毛断面形状を変化させることにより、消費パワーが約22%少なくてすむことになる。計算は、どのような形状のべん

毛でも剛体を保つとの前提で行ったが、実際にはすべての形状が剛体を保てるとは限らない。詳しくは強度計算を要するが、大きなモーメントが発生することが予想される接合部付近が太くなることは強度上も有効であると考えられる。マイクロマシンへの応用の際には、剛体を保てる範囲でべん毛断面形状を変化させることによって、効率の上昇をはかることができる。

文 献

- (1) Phan-Thien, N., T-Tran-Cong and Ramia, M., A Boundary-Element Analysis of Flagellar Propulsion, *J. Fluid Mech.*, 184 (1987), 533-549.
- (2) 後藤知伸・多賀康博・高野泰斉, 境界要素法によるべん毛の抵抗力理論の検討, 機論, 63-605, B(1997), 188-193.
- (3) 後藤知伸・益田晋也・寺田和将・高野泰斉, 細菌の遊泳運動の観察と境界要素解析の比較, 機論, 67-654, B(2001), 330-335.
- (4) 藤田達也・河合達雄, らせん状べん毛を有する微生物の最適形状, 機論, 67-655, B(2001), 753-758.
- (5) Keller, J. B. and Rubinow, S. I., Swimming of Flagellated Microorganisms, *Biophys. J.*, 16 (1976), 151-170.
- (6) 高野泰斉・後藤知伸・白井由和, 単毛性細菌の推進機構の解析, 機論, 62-593, B(1996), 211-217.